

目視調査に基づくマルコフ連鎖を用いたRC造建築物の劣化予測の検討

正会員 ○鈴木 邦康<sup>\*1</sup>  
同 森久保良希<sup>\*2</sup>  
同 十河 哲也<sup>\*3</sup>  
同 片山 大輔<sup>\*3</sup>  
同 濱 幸雄<sup>\*4</sup>

1.材料施工-13.改修・維持保全

鉄筋コンクリート造, 劣化調査, マルコフ連鎖, 遷移確率, 劣化予測

1. はじめに

既存建築物を適切に維持管理する方法として、簡便な目視調査結果に基づいて適切な診断および最適な補修・改修工法を選定できるシステムが構築されれば、マンションや公共施設などの施設管理者にとって非常に有用であると考えられる。このような視点から、著者らは既存建築物を対象として、専門技術者の経験や実績をデータベースとして組み込んだ建築物保全支援システムの開発を行っている。既報<sup>1), 2)</sup>では、開発中の建築物保全支援システムの概要を示すとともに、システムの調査診断機能を用いた試行調査結果について報告した。

本報では、上記システムの要素技術のうち、マルコフ連鎖を用いた劣化進行予測に関して、実際の調査結果に基づいて算出した遷移確率について検討した。

2. マルコフ連鎖を用いた劣化進行予測

2.1 マルコフ連鎖の適用法

マルコフ連鎖とは、図1に示すようにある状態のものがある遷移確率で次の状態に移行する概念であり、これによって現在の様子のみから未来の状態を予測することができる。建設分野での適用事例としては、橋梁のメンテナンスへの適用<sup>3)</sup>などがある。

本システムにおける劣化進行予測は、まず、劣化調査結果から調査時点での建築物の劣化割合を算出し、マルコフ連鎖モデルから劣化進行速度の指標となる遷移確率を求める。次に、求めた遷移確率を再びマルコフ連鎖モデルにあてはめて調査

時点以降の劣化進行予測を行うものである。本システムでは、建物外観について、壁、柱および梁

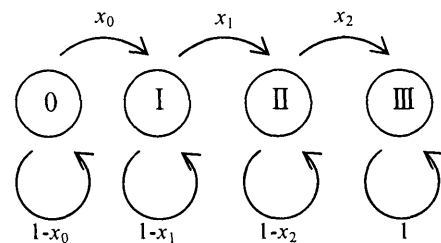


図1 マルコフ連鎖推移図

表1 外壁の劣化分類と劣化度

分類	記号	劣化症状	劣化度
a 躯体の劣化	a1	錆汁を伴うひび割れ・はく離	Ⅲ
	a2	はく離・スケール・欠損 (発錆鉄筋の露出)	Ⅲ
	a3	鉄筋に沿うひび割れ・はく離	Ⅲ
	a4	白華を伴うひび割れ・はく離	Ⅱ
	a51	比較的大きな (幅0.4mm以上) ひび割れ	Ⅱ
	a52	比較的小さな (幅0.2mm以上) ひび割れ	Ⅱ
	a53	微細な (幅0.2mm未満) ひび割れ	Ⅰ
	a6	はく離・スケール・欠損 (発錆鉄筋なし)	0
	a7	豆板 (ジャンカ)	0
	a8	ポップアウト	0
a9	その他 (網目状ひび割れ等)	0	
b 外装仕上げ材の劣化	b1	はく離・欠損 (躯体の露出)	Ⅲ
	b2	浮き	Ⅲ
	b3	ひび割れ	Ⅱ
	b4	摩耗 (下地の露出)	Ⅲ
	b5	はく離・はく離・欠損 (下地の露出)	Ⅲ
	b6	ひび割れ	Ⅲ
	b7	ふくれ	Ⅱ
	b8	表層のみの軽微なひび割れ・はく離・摩耗	Ⅱ
	b9	白亜化 (チョーキング)	Ⅰ
	b10	局部的汚れ (鋼製付属物からの錆汚れを含む)	0
c 劣化その他	c1	開口部材の錆・変形・脱落等	0
	c2	水切部材の錆・変形・脱落等	0
	c3	手摺部材の錆・変形・脱落等	0
	s1	破断・ひび割れ (貫通している)	Ⅲ
	s2	はく離	Ⅲ
	s3	被着材破断	Ⅲ
	s4	充填モルタルのひび割れ・浮き・はく離	Ⅲ
	s5	ひび割れ (貫通していない)	Ⅱ
	s6	しわ・変形・変質等	Ⅱ
	s7	汚れの付着・周囲の汚れ・表面塗膜はく離	Ⅰ
s0	その他	0	

Examination on Deterioration Progress of RC Buildings based on Visual Observation  
using Markov Chain

SUZUKI Kuniyasu et al.

を調査単位として表1に示す劣化症状の有無を目視により判断し、劣化割合を全調査単位数に対する各劣化度の調査単位数の割合として求めている。マルコフ連鎖モデルは、建物の劣化状態を劣化度0～Ⅲの4段階に分類して適用するものとし、この場合の劣化進行予測式は(1)式で表わされる。

$$\begin{pmatrix} P_0 \\ P_I \\ P_{II} \\ P_{III} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-x_0 & 0 & 0 & 0 \\ x_0 & 1-x_1 & 0 & 0 \\ 0 & x_1 & 1-x_2 & 0 \\ 0 & 0 & x_2 & 1 \end{pmatrix}^t \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \dots (1)$$

ここに、 $P_0 \sim P_{III}$  :  $t$ 年後の劣化割合  
 $t$  : 建築時からの経過年数  
 $x_0 \sim x_2$  : 各劣化度における遷移確率

### 2.2 遷移確率の算出方法

遷移確率は、前述のように(1)式の左辺に劣化調査の結果から得られた劣化割合を、 $t$ には建物建築時から調査時点までの経過年数を代入して算出する。なお、調査結果の劣化割合が0になる場合、(1)式から遷移確率を算出できないため、その劣化度の遷移確率を便宜的に1として取り扱うものとする。

### 3. 調査結果に基づく遷移確率の検討

#### 3.1 対象とした調査の概要

本報では、平成19年にシステムの試行調査として行った北海道室蘭市内のRC造小・中学校校舎の劣化調査結果<sup>1)</sup>のうち、補修時期が不明なものを除く37建物を対象に検討した。また、同市で平成16年に行った市立小・中学校施設耐震化優先度調査<sup>4)</sup>の中のコンクリート圧縮強度試験結果との関係についても検討した。

#### 3.2 遷移確率の算出結果

表2に外装仕上げ材がリシン吹付け仕上げによる建物について、表3にモルタル仕上げによる建物について、調査結果に基づき算出した遷移確率を示す。なお、表中の網掛け部が遷移確率を1とした部分である。

#### 3.3 調査結果と計算結果の劣化割合の比較

調査結果から算出できない遷移確率を1とした場合の影響について、若干の検討を行った。表4に、計算による劣化割合と調査結果との比較の一例を示す。同表には躯体コンクリートについて、劣化度I→II、劣化度II→IIIおよびその両方の遷移確率が算出できない建物について1棟ずつ示した。

表2 リシン吹付け仕上げによる建物の遷移確率

No.	調査施設		経過 年数	躯体コンクリートの遷移確率			リシン吹付け仕上げの遷移確率		
	施設記号	建物名称		劣化度0→I	劣化度I→II	劣化度II→III	劣化度0→I	劣化度I→II	劣化度II→III
1	P1	管理棟	6	0.019	1.000	0.319	0.018	0.252	1.000
2	P1	教室棟	6	0.002	0.000	1.000	0.012	0.286	1.000
3	P2	教室棟1	7	0.000	0.000	0.000	0.012	0.198	0.182
4	P2	教室棟2	7	0.002	0.138	0.000	0.007	0.243	1.000
5	P3	校舎棟	8	0.006	0.490	0.000	0.025	0.438	1.000
6	P4	教室棟	10	0.008	1.000	0.000	0.014	0.113	0.145
7	P4	特別教室棟	10	0.024	0.808	0.022	0.017	0.012	1.000
8	P5	教室棟	12	0.000	0.000	0.000	0.004	1.000	1.000
9	P5	管理棟	12	0.004	0.077	0.000	0.005	0.053	1.000
10	P5	特別棟	12	0.000	0.000	0.000	0.002	0.190	1.000
11	P6	教室棟	14	0.006	0.416	0.000	0.010	0.144	1.000
12	P6	管理棟	14	0.010	0.473	0.010	0.010	0.115	0.604
13	M1	管理棟	17	0.005	0.483	0.000	0.011	0.992	0.342
14	M1	教室棟	17	0.005	1.000	0.457	0.006	0.155	1.000
15	P7	校舎棟	25	0.007	1.000	0.000	0.009	0.142	1.000
16	P8	教室棟1	26	0.010	1.000	0.097	0.022	1.000	1.000
17	P8	管理棟	26	0.004	1.000	0.261	0.019	1.000	1.000
18	P8	教室棟2	26	0.007	0.086	0.235	0.020	1.000	1.000
19	P9	教室管理棟	27	0.008	1.000	0.048	0.014	0.156	1.000
20	P10	管理棟	27	0.002	1.000	0.041	0.008	0.117	0.071
21	P10	教室棟	27	0.003	0.573	0.071	0.004	0.072	0.382
22	M2	教室棟	29	0.002	1.000	0.072	0.005	0.451	0.153
23	M2	管理棟	29	0.006	0.220	0.032	0.006	0.166	1.000
24	M4	特別教室棟	30	0.003	1.000	0.307	0.009	1.000	1.000
25	P11		30	0.013	0.167	0.126	0.017	0.346	1.000
26	P12	教室管理棟	30	0.012	1.000	0.078	0.004	1.000	1.000
27	P12	特別管理棟	30	0.006	0.308	0.315	0.015	1.000	1.000
28	P13	校舎棟	31	0.002	1.000	0.170	0.008	0.476	0.604
29	P14	教室棟1	31	0.008	1.000	0.135	0.041	0.198	1.000
30	P15		43	0.007	0.031	1.000	0.013	0.252	1.000
31	M5	教室棟	48	0.002	1.000	1.000	0.002	1.000	0.080

表3 モルタル仕上げによる建物の遷移確率

No.	調査施設		経過年数	躯体コンクリートの遷移確率			モルタル仕上げの遷移確率		
	施設記号	建物名称		劣化度0→I	劣化度I→II	劣化度II→III	劣化度0→I	劣化度I→II	劣化度II→III
32	P15		4	0.103	1.000	0.014	0.021	1.000	1.000
33	P16	特別教室棟	16	0.006	0.157	0.109	0.001	0.000	0.000
34	P16	管理教室棟	16	0.008	1.000	0.000	0.000	1.000	1.000
35	P17	教室棟3	43	0.011	1.000	0.010	0.005	0.043	1.000
36	P17	教室棟1	43	0.001	0.183	0.000	0.011	1.000	0.283
37	P17	教室棟2	43	0.001	1.000	0.000	0.012	1.000	0.764
38	M6	校舎棟	47	0.011	0.279	0.026	0.011	1.000	1.000

表4に見られるように、調査結果と計算結果の劣化割合の差は小さく、遷移確率が求まらない場合、これを1として取り扱ってもその後の劣化進行予測に大きな差は生じないものと考えられる。

3.4 遷移確率と経過年数の関係

図2~4は、表2に示すリシン吹付け仕上げによる建物について、劣化度ごとに遷移確率と経過年数の関係を示したものである。ただし、遷移確率を1としたものは除いた。

図2より、劣化度0からIへの遷移確率は躯体コンクリート及び外装仕上げ材ともに、経過年数にかかわらず非常に小さな値となっている。これに対して、劣化度IからIIへの遷移確率および劣化度IIからIIIへのそれは、図3、4に見られるように大きいものでは0.8程度の値となっている。このことから、建物の外観に劣化症状が現れるまでの遷移確率は非常に小さく、劣化症状が発生するまでにある程度の時間を要するが、いったん劣化が生じるとその進行速度は早まるものと考えられる。今回算出した遷移確率はばらつきが大きく、経過年数との間に一定の関係は見られない。また、図4より、劣化度IIからIIIへの遷移確率については、躯体コンクリートよりも外装仕上げ材のほうが大きな値を示す傾向がある。

3.5 遷移確率とコンクリート強度の関係

図5は、各建物の設計基準強度に対するコンク

表4 調査結果と計算結果の劣化割合の比較

施設記号 建物名称	経過年数	劣化度	劣化割合(%)	
			調査結果	計算結果
P14 教室棟	31	0	78.7	78.0
		I	0.0	0.6
		II	4.7	4.9
		III	16.5	16.5
P15	43	0	72.9	73.9
		I	14.6	14.0
		II	0.0	0.4
		III	12.5	11.6
M5 教室棟	48	0	89.6	90.8
		I	0.0	0.2
		II	0.0	0.2
		III	10.4	8.8

リート圧縮強度の比と躯体コンクリートの遷移確率の関係を示したものである。

同図より、検討対象とした調査結果には強度比が1.0未満、すなわち強度試験値が設計基準強度を下回った校舎は無く、同じ強度比でも遷移確率

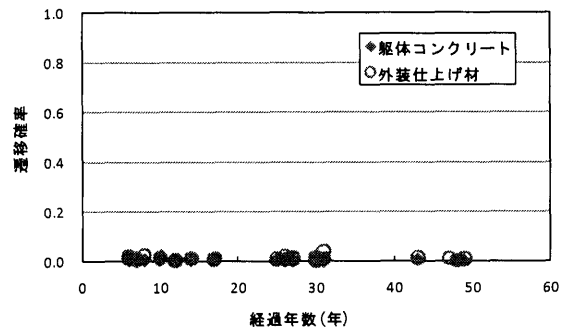


図2 遷移確率と経過年数の関係 (0→I)

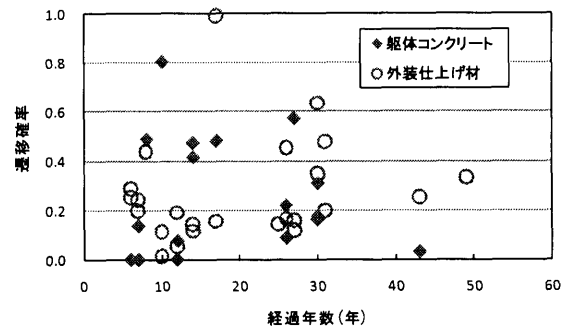


図3 遷移確率と経過年数の関係 (I→II)

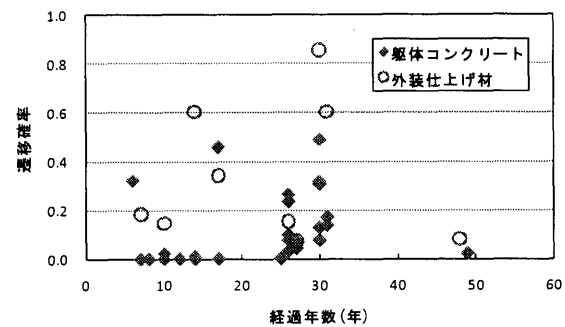


図4 遷移確率と経過年数の関係 (II→III)

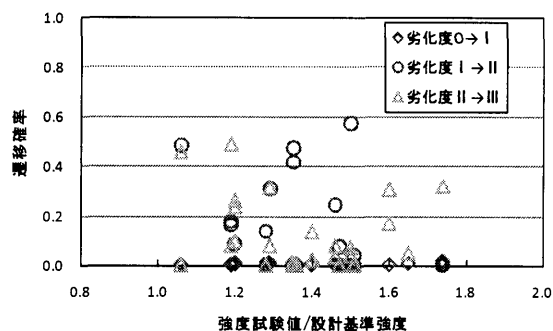


図5 遷移確率と強度比の関係

はばらつく結果となっている。

遷移確率がばらついた理由の一つとして以下のことが考えられる。試行調査として行った目視調査において、劣化度Ⅲの劣化症状である錆汁を伴うひび割れ・はく離や発錆鉄筋の露出が見られた箇所では、明らかにかぶり厚が不足している箇所が多く見受けられた。したがって、かぶり厚が確保されている建物に比べて、かぶり厚が不足していれば経過年数が短い建物でも劣化が早期に進行し、調査結果に基づいて算出した遷移確率に大き

く影響を与えているものと考えられる。

#### 4. 調査結果に基づく劣化予測例

図6および図7は表2中のNo.7の建物について、それぞれ躯体コンクリートおよび外装仕上げ材の劣化進行予測を示したものである。

図6, 7のように、マルコフ連鎖モデルを適用することで、調査時点での劣化割合に基づいて、その後の劣化予測を容易に把握することができる。今後は、定期的な調査結果に基づく劣化予測の検証が必要になる。

#### 5. まとめ

目視調査結果に基づき、マルコフ連鎖を用いた劣化進行予測における遷移確率について検討した。その結果、劣化度0からIへの遷移確率は非常に小さいが、その後ばらつきはあるが大きな値となる。また、今回の検討では遷移確率と経過年数あるいはコンクリート強度との間に明確な関係は見られなかった。

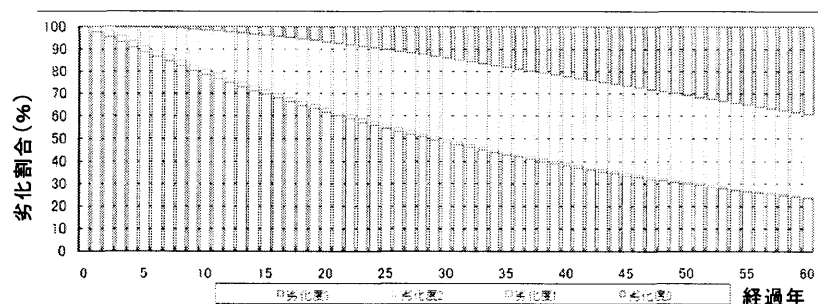


図6 躯体コンクリートの劣化進行予測例

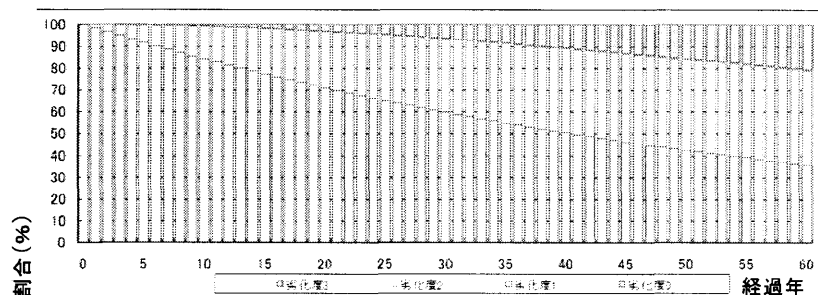


図7 外装仕上げ材の劣化進行予測例

#### 参考文献

- 1) 鈴木, 森久保, 十河, 片山, 濱: 鉄筋コンクリート造建築物の保全支援システムの開発と試行調査, 日本建築学会北海道支部研究報告集 No.81, 2008.6.
- 2) 北海道立北方建築総合研究所: 市町村の建築物保全支援システムに関する研究開発, 調査研究報告集, 2008.5
- 3) 牟禮健一, 濱田秀則, 横田弘, 山路徹: RC 栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発, コンクリート工学年次論文集, 第15巻, 第1号, 2004.
- 4) 室蘭市: 学校施設の耐震化推進計画策定支援事業報告書, 2005.3.

- \*1 釧路工業高等専門学校准教授・博(工) Assoc. Prof., Kushiro National College of Technology, Dr. Eng.
- \*2(株)日本ファシリティ Nippon Facility Co. Ltd.
- \*3 北海道立北方建築総合研究所 Hokkaido Northern Regional Building Research Institute.
- \*4 室蘭工業大学准教授・博(工) Assoc. Prof., Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.